

Aplicação do Método Particle Swarm Optimization na Obtenção de Nomogramas para a Avaliação da Segurança Dinâmica

Victor F. Carvalho *. Wesley Peres*. João Alberto P. Filho**. Bruna C. Ferreira*

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ, São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil (e-mail: victorferreiracarvalho@hotmail.com; wesley.peres@ufsj.edu.br; bruna.cfpta@hotmail.com)

**Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Juiz de Fora, Brasil (e-mail: joao.passos@uffj.br)

Abstract: Dynamic Security Regions (DSR) are tridimensional graphics that evaluate the power system security when the system is divided into three generation groups, and the generated power is transferred among them. They allow the evaluation of different generation scenarios considering the security limits for the damping ratios associated with electromechanical oscillation modes. The main problem in obtaining the DSR is the high computational effort required due to the several power flows and modal analyses. This paper presents an efficient methodology based on the Particle Swarm Optimization method to obtain DSR. The results obtained for the New England test system are promising in the face of accuracy and the reduced computational burden.

Resumo: As Regiões de Segurança Dinâmica (RSD) são gráficos tridimensionais que permitem a avaliação da segurança do sistema dividido em três grupos de geração a medida que se realiza a transferência de geração entre estes. Estas permitem avaliar diferentes cenários de geração considerando os fatores de amortecimento associados aos modos de oscilação como limites de segurança. O maior problema na obtenção das RSD é o elevado esforço computacional requerido devido aos vários casos de fluxos de potência e de análises modais que devem ser executados. Nesse trabalho apresenta-se uma eficiente metodologia para construção das RSD baseada na técnica *Particle Swarm Optimization (PSO)*. Os resultados obtidos para o sistema *New England* são promissores do ponto de vista da precisão e do reduzido esforço computacional.

Keywords: Power System Security; Dynamic Security Regions; Particle Swarm Optimization; Small-Signal Stability.

Palavras-chaves: Segurança de Sistemas de Potência; Regiões de Segurança Dinâmica; Enxame de Partículas; Estabilidade a Pequenas Perturbações.

1. INTRODUÇÃO

A garantia de uma operação segura dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) é de extrema importância, principalmente diante da crescente demanda por energia sujeita a restrições ambientais (que limitam a expansão das redes) e econômicas. Nesse contexto, o desenvolvimento de ferramentas computacionais eficientes para a análise de segurança estática e dinâmica é um campo fértil para investigações (Morison et al., 2004).

A avaliação da segurança de um sistema deve ser feita para o caso base e um conjunto de contingências críticas consideradas. Essa avaliação pode ser realizada a partir de margens de estabilidade, índices de segurança ou regiões de segurança. As Regiões de Segurança (RS) são gráficos tridimensionais que permitem a avaliação da capacidade de transferência de potência entre grupos de geração do sistema (Almeida et al., 2013; Parreiras et al., 2017). Dessa forma,

tem-se uma visualização da distância entre o ponto de operação atual e os limites de segurança.

No contexto da avaliação da segurança estática do sistema, as RS Estáticas (RSE) apresentam as regiões seguras em que as seguintes restrições são satisfeitas: tensões nodais, gerações de potência ativa e reativa, carregamento dos circuitos e convergência do fluxo de potência (Almeida et al., 2013). Na avaliação da segurança dinâmica a pequenas perturbações (em que se verifica o amortecimento dos modos de oscilação eletromecânicos), tem-se as RS Dinâmicas (RSD) em que a região segura garante fatores de amortecimento mínimos (Parreiras et al., 2017).

A construção das RSE e RSD baseiam-se na divisão do sistema em três grupos geradores (Morison et al., 2004; Neto et al., 2010; Tinoco et al., 2021). Para facilitar a análise, gráficos bidimensionais denominados nomogramas são utilizados (que são projeções das RS). As ferramentas computacionais comerciais convencionais para construção das RS são

baseadas em direções de transferência de geração radiais com origem no ponto de operação atual.

As RS obtidas por métodos convencionais serão tão precisas quanto menor for o passo de transferência de potência utilizado. Tal premissa sustenta que a construção destas regiões requer elevado tempo computacional. Isso porque uma elevada quantidade de fluxos de potência (para RSE e RSD) e de análise modal (para RSD) é requerida. Ressalta-se que o esforço para obtenção das RSD é maior do que para a obtenção da RSE.

Para a redução do esforço computacional na construção das RSE, diferentes trabalhos da literatura têm proposto metodologias alternativas (ou melhorias). Em (Almeida et al., 2013) técnicas de processamento paralelo foram utilizadas. Conceitos de RS Adaptativas foram apresentadas por (F. Tavela, 2020). Em (Pareto, 2016) as RSE são construídas com base em malhas triangulares que cobrem o espaço de possíveis soluções para o suprimento de carga. A utilização da ferramenta de Fluxo de Potência Ótimo Linear Sequencial para a construção das RSE foi proposta em (Moreira et al., 2018). Por fim, em (Tinoco et al., 2021) a técnica de otimização *Particle Swarm Optimization* (PSO) foi aplicada, permitindo uma redução expressiva do esforço computacional.

No caso da RSD, o método convencional de construção foi investigado por (Parreiras et al., 2017). A redução do tempo computacional foi obtida a partir a aplicação de técnicas de cálculo parciais de autovalores durante as análises modais. Em (Assis et al., 2017), as RSD são utilizadas para avaliação da segurança em sistemas com elos multi-terminais de corrente contínua.

O presente trabalho visa a aplicar o método PSO para a construção de RSD. Ao trabalhar com uma população de indivíduos (partículas) que se deslocam livremente no espaço de busca, o PSO elimina a necessidade da definição de direções de busca e passos reduzidos de transferência de geração. A metodologia é aplicada no sistema *New England* e sua precisão e eficiência são avaliadas com base na metodologia convencional.

2. REGIÕES DE SEGURANÇA

2.1 Definição

A RS é um gráfico tridimensional construído a partir de um ponto de operação que permite avaliar diferentes cenários de despacho em um sistema composto por três grupos de geração. Na Fig. 1 ilustra-se uma RS genérica tridimensional na qual identifica-se: a região de operação segura (em que todas as restrições físicas e operacionais são atendidas), o limite de segurança (que define a região segura) e a região de operação insegura (na qual ao menos um limite é violado). Para facilitar a análise, constrói-se gráficos denominados nomogramas, que são projeções bidimensionais (planos G1xG2, G1xG3 e G2xG3) (Almeida et al., 2013). É importante acrescentar que:

- i. Mais de três grupos de geração poderiam ser considerados na análise. Entretanto, nesse caso, a RS

não seria atrativa do ponto de vista prático (Tinoco et al., 2021);

- ii. Na denominada RSE são considerados limites estáticos tais como: tensão nodal, geração de potência reativa, capacidade de geração de potência ativa dos grupos, capacidade térmica dos circuitos e contingência (Almeida et al., 2013; Tinoco et al., 2021);
- iii. Na denominada RSD para análise da segurança à pequenas perturbações (objeto de estudo desse trabalho), são considerados os limites: capacidade de geração de potência ativa dos grupos e diferentes faixas de coeficientes de amortecimentos associados aos modos de oscilação do sistema (Parreiras et al., 2017).

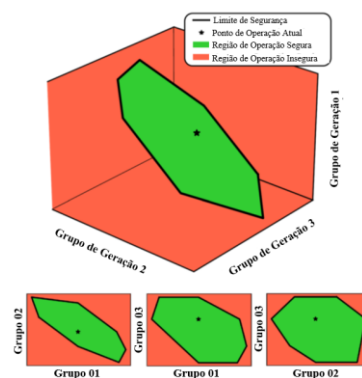


Fig. 1 Região de segurança genérica. Adaptado de (F. M. Tavela et al., 2022).

2.2 Processo de Construção Convencional da RS

O processo de construção detalhado em (Almeida et al., 2013) é válido tanto para a construção da RSE quanto da RSD e pode ser sintetizado nos seguintes passos:

1. Divisão do sistema em três grupos de geração;
2. Determinação dos limites e direções de busca;
3. Determinação das regiões exportadoras (EXP) e importadoras (IMP);
4. Determinação dos fatores de participação de grupo e individuais;
5. Aplicação da ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência entre áreas.

2.3 Divisão do Sistema em Três Grupos de Geração

Um grupo pode ser composto por um ou mais geradores e diferentes estratégias podem ser utilizadas para a divisão do sistema. Em (Alves et al., 2018), por exemplo, a RS é utilizada para a quantificação da penetração de energia eólica em sistemas de transmissão (nesse caso um dos grupos representa um parque eólico). Ressalta-se que a carga é mantida constante no processo de construção da RS.

2.4 Determinação dos Limites e Direções de Busca

O conceito de direções de busca pode ser entendido a partir da Fig. 2. Partindo-se do ponto de operação inicial, define-se direções radiais (na figura tem-se 4 direções iniciando-se em um ângulo de 45°). O quadrante no qual uma direção de transferência está localizada é importante para a definição das regiões (IMP e EXP) e para o cálculo dos fatores de participação de grupo. Um dos grupos (denominado grupo de balanço) deverá suprir a variação das perdas durante o processo (grupo que possui a barra de referência do sistema).

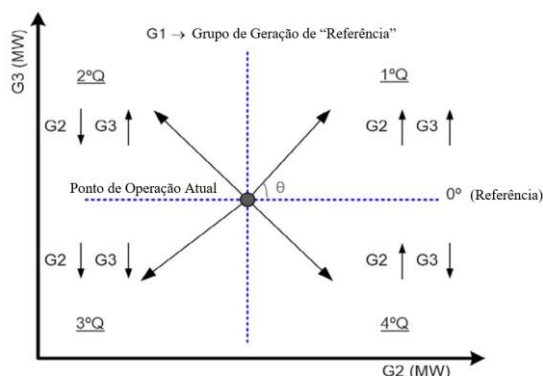


Fig. 2 Definição das direções de busca. Adaptado de (Tinoco et al., 2021).

Os limites considerados na construção da RSE são:

- Tensão:** a partir desse ponto, a tensão em ao menos uma das barras viola os limites máximo ou mínimo, no ponto de operação atual ou contingências;
- Térmico:** a partir desse ponto, o carregamento máximo (MVA) em ao menos um circuito é violado no ponto de operação atual ou contingências;
- Reativo:** a partir desse ponto os limites de geração de potência reativa (máximo ou mínimo) são violados por ao menos um gerador no ponto atual ou contingências;
- Contingência:** a partir desse ponto, o fluxo de potência não converge em ao menos um dos cenários de contingência;
- MW:** a partir desse ponto o fluxo de potência no ponto de operação atual não tem solução ou um dos limites de geração dos grupos foi violado (máximo ou mínimo).

Quando todos os limites são simultaneamente satisfeitos, tem-se a Região Segura da RSE, conforme ilustrado nas Fig. 1 e 3.

Para a construção das RSD, além dos limites de MW, considera-se limites para os fatores de amortecimento ξ associados aos modos de oscilação do sistema em malha fechada (com os controladores tais como estabilizadores de sistemas de potência) (Parreiras et al., 2017; Peres et al., 2021). Nesse trabalho, considera-se:

- $\xi \geq 5\%$: partindo-se do ponto atual até esse ponto, o fator de amortecimento associado ao modo de

oscilação dominante é igual ou superior a 5%. O interior da curva definida por esse limite é chamado de Região Segura.

Nesse trabalho, por simplicidade, fora da região segura tem-se que:

- o sistema é estável porém o coeficiente de amortecimento é inferior a 5% (região não segura);
- o sistema é instável dinamicamente ($\xi < 0$) mas tem solução do fluxo de potência;
- o fluxo de potência não convergiu ou o método de cálculo de autovalores (modos de oscilação para os quais calcula-se os fatores de amortecimento) não convergiu (Parreiras et al., 2017).

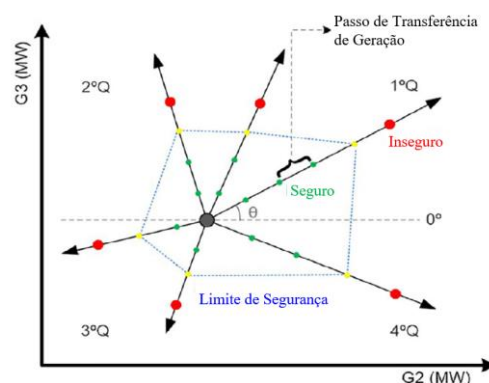


Fig. 3 Limites e processo de transferência de potência. Adaptado de (Tinoco et al., 2021).

2.5 Determinação das Regiões Exportadoras (EXP) e Importadoras (IMP)

Para cada direção de busca deve-se definir quais as regiões atuam como Exportadora (aumentando a geração de potência) ou Importadora (reduzindo o montante de geração). No primeiro quadrante da Fig. 2 observa-se que os grupos 2 e 3 aumentam suas gerações a partir do ponto de operação atual. Nesse caso os grupos 2 e 3 compõem a região exportadora enquanto o grupo 1 atua como a região importadora (reduzindo a geração) bem como o grupo de balanço (supre as perdas). Em (Almeida et al., 2013) é realizada uma análise minuciosa para diferentes direções de busca.

2.6 Determinação dos Fatores de Participação de Grupo e Individuais

O processo de transferência de potência entre as regiões EXP e IMP é ilustrado na Fig. 3. Observa-se que para cada direção é feito um incremento de potência (*passo*) partindo-se do ponto de operação atual. Quando mais de um grupo compõe a região EXP ou IMP é necessário dividir a potência entre os grupos. As expressões matemáticas para o cálculo do *fator de grupo* FPG_i ($i = 1,2,3$) podem ser obtidas em (F. Tabela, 2020) e o incremento de potência ΔG_i de um grupo i , pode ser calculada conforme (1):

$$\Delta G_i = FPG_i \cdot \text{passo} \quad (1)$$

O somatório dos fatores dos grupos que compõem a região IMP deve ser igual ao somatório dos fatores do grupo EXP.

Uma vez definido o montante de incremento de potência a ser alocado em cada grupo, deve-se partilhá-lo entre todos os geradores que compõem o respectivo grupo. Para isso deve-se calcular os fatores de participação individuais de cada gerador j que compõe o grupo i (FPI_j^i). Neste trabalho os fatores individuais são calculados com base na capacidade máxima de geração de cada grupo, conforme a equação (2).

$$FPI_j^i = \frac{P_{G_j}^{max}}{\sum_{k \in \Omega_i} P_{G_k}^{max}} \quad (2)$$

sendo $P_{G_j}^{max}$ o limite máximo de potência ativa do gerador j e Ω_i o conjunto de geradores que compõem o grupo i . A equação (3) apresenta o cálculo do incremento de potência de um gerador j de um grupo i . A atualização da potência gerada é realizada via equação (4) para todos as unidades do sistema, sendo que a potência gerada pela barra de referência (barras $V\theta$ presente no grupo 1) deverá ser atualizada após a solução do fluxo de potência devido às perdas.

$$\Delta P_{G_j} = FPI_j^i \cdot \Delta G_i \quad (3)$$

$$P_{G_j} = P_{G_j}^0 + \Delta P_{G_j} \quad (4)$$

em que $P_{G_j}^0$ é a potência no ponto de operação inicial.

2.7 Ferramenta para o Cálculo da Máxima Transferência de Potência

Conforme ilustrado na Fig. 3, para a construção da RSE (região segura nas Fig. 1 e 3), partindo-se do ponto de operação inicial, faz-se sucessivas atualizações de potência para cada direção conforme a equação (4). Para cada novo ponto, o fluxo de potência (via o método de Newton-Raphson) é executado e o processo é encerrado em uma dada direção quando o um dos limites estáticos é violado (MW, tensão, térmico, reativo ou contingência). Ressalta-se que esse é um processo simplificado onde somente a região segura é calculada. Outras curvas (limites estáticos individuais) também podem ser exibidas conforme apresentado em (Almeida et al., 2013).

No caso da RSD, após a solução do fluxo de potência em cada ponto atualizado (vide Fig. 3), é realizada a análise modal via o método QR (Francis, 1961) para análise dos coeficientes de amortecimento (caso o fluxo de potência convirja). O processo é terminado quando os limites de MW ou de faixa de amortecimento ($\xi \leq 5\%$) são alcançados (Parreiras et al., 2017). Adicionalmente, em (Parreiras et al., 2017) métodos eficientes de cálculo de autovalores são utilizados para a redução do esforço computacional.

Uma vez definidos os pontos de máxima transferência de potência em cada direção, estes são interligados para construção da RSE ou RSD.

3. METODOLOGIA PROPOSTA PARA OBTENÇÃO DA RSD

Na seção anterior a metodologia convencional para obtenção da RSD foi apresentada. Tal metodologia é baseada em passos

de transferência de potência e a precisão das RSD será maior tanto quanto menor forem tais passos (o que eleva o esforço computacional). Em (Tinoco et al., 2021) a técnica de otimização PSO foi empregada para a obtenção das RSE com uma redução do esforço computacional e precisão satisfatória. A principal vantagem é que as partículas do PSO são livres para se deslocarem no espaço de busca (região factível definida pelos limites de geração) sem a necessidade da especificação das direções e dos passos de transferência de potência. O presente trabalho aplica a técnica PSO na obtenção de RSD com o objetivo de avaliar o efetivo ganho computacional na análise de segurança à pequenas perturbações.

3.1 Definição das Variáveis

Considerando o primeiro grupo gerador (G_1) como o de balanço, as variáveis de otimização da metodologia proposta são as gerações dos demais grupos: G_2 e G_3 .

3.2 Modelo de Otimização Proposto

O modelo de otimização proposto para construção da RSD é apresentado na equação (5).

$$\text{maximizar } Z = \sqrt{(\Delta G_2)^2 + (\Delta G_3)^2} \quad (5a)$$

$$\text{sujeito a } G_2^{min} \leq G_2 \leq G_2^{max} \quad (5b)$$

$$G_3^{min} \leq G_3 \leq G_3^{max} \quad (5c)$$

$$\xi \geq \xi^d \quad (5d)$$

em que ΔG_2 e ΔG_3 denotam a distância do limite da curva (que define a região segura) e o ponto de operação inicial. O termo ξ^d é o fator de amortecimento desejado que limita a região segura (nesse trabalho $\xi^d = 5\%$).

A Fig. 4 ilustra o cálculo da função objetivo em que a população do PSO (partículas) deverá mapear a região segura. A função aptidão de cada partícula será a distância entre o ponto de operação inicial (G_2^0, G_3^0) e a distância a ser maximizada destas no plano $G_2 \times G_3$ (d_c por exemplo para a partícula c).

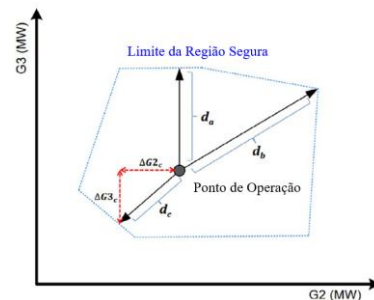


Fig. 4 Ilustração do cálculo da função objetivo. Adaptado de (Tinoco et al., 2021).

3.3 Particle Swarm Optimization (PSO)

O método de Otimização baseado em Enxames de Partículas (PSO) foi proposto em (Kennedy & Eberhart, 1995) e baseia-se no comportamento social de bandos de pássaros na busca

por alimentos. Os indivíduos (pássaros) da população (bando) se movimentam no espaço sofrendo influência das suas melhores experiências anteriores (fator cognitivo) e das melhores experiências de suas vizinhas (fator social). Nesse trabalho, segue-se a estratégia proposta por (Tinoco et al., 2021), em que a experiência social é desprezada. Conforme ilustrado na Fig. 5, a tendência é que cada partícula se desloque em relação a sua melhor experiência individual. No final do processo, as posições destas serão utilizadas para mapear os limites da região de segurança.

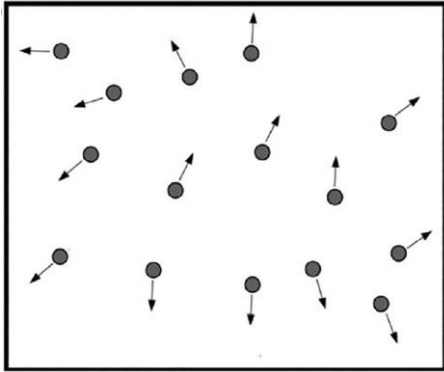


Fig. 5 Comportamento das partículas na ausência do fator social. Adaptado de (Tinoco et al., 2021).

Em uma determinada iteração (geração) k , a cada partícula i está associada: (i) uma velocidade v_i^k , (ii) uma posição x_i^k e (iii) uma memória da sua melhor posição durante o processo de busca $pbest_i$ (fator cognitivo). Essas grandezas são vetores bidimensionais (mesma dimensão do espaço de busca: as gerações dos grupos 2 e 3). As equações (6)-(8) governam o movimento das partículas durante o processo de otimização.

$$v_i^{k+1} = w^k \cdot v_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_i - x_i^k) \quad (6)$$

$$w^k = w_{max} - \left(\frac{w_{max} - w_{min}}{k_{max}} \right) \cdot k \quad (7)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (8)$$

em que c_1 é uma constante de aceleração positiva (igual à 2), r_1 é um número randômico, w^k é a constante de inércia na geração k que controla a capacidade de busca do método (esta sofre um decréscimo de $w_{max} = 1,5$ até $w_{min} = 0,6$) e k_{max} é o número de gerações. A velocidade (nesse trabalho) é limitada entre $[-325, 325]$: tais limites dependem do sistema e são definidos com base na capacidade máxima de geração dos grupos. As posições (vetor de soluções da equação (6)) são limitadas de acordo com (5b)-(5c). Quando ocorrem violações, as variáveis são colocadas em seus limites violados. O algoritmo é apresentado na Fig. 6.

Início	
Definir a função objetivo e as variáveis do problema e inicializar os parâmetros do algoritmo	
Inicializar contador de iterações	$k \leftarrow 0$
Inicializar as posições x_i^k e velocidades v_i^k de todas as partículas dentro dos limites permitidos	
Calcular a função aptidão associada à cada partícula	
Para todas as partículas fazer: $pbest_i = x_i^k$	
Repita	
Para Todas as Partículas Faça	
Atualizar a velocidade v_i^{k+1} e testar a factibilidade	
Atualizar a posição x_i^{k+1} e testar a factibilidade	
Calcular a função aptidão associada à partícula	
Se o valor da função aptidão for maior que a da melhor posição individual corrente, fazer: $pbest_i = x_i^{k+1}$	
Fim-Para	
$k \leftarrow k + 1$	
Fim-Repita	
Fim	

Fig. 6 Algoritmo do PSO.

3.4 Avaliação da Função Aptidão

Como anteriormente mencionado, as variáveis do problema proposto são as gerações dos grupos 2 e 3. Assim, a posição de uma partícula i na iteração k será dada pela equação (8).

$$x_i^k = [G_2^k \quad G_3^k] \quad (8)$$

A geração do grupo de balanço pode ser estimada conforme a equação (9):

$$G_1^k = P_L - G_2^k - G_3^k \quad (9)$$

em que P_L é o somatório das demandas de potência ativa do sistema. Os incrementos de geração de potência são dados conforme a equação (10):

$$\Delta G_i^k = G_i^k - G_i^0 \quad i = \{1,2,3\} \quad (10)$$

em que G_i^k é a geração do grupo i na iteração k e G_i^0 é a geração no ponto de operação inicial. Calculados os incrementos de cada grupo, procede-se com a divisão destes entre as unidades individuais conforme a equação (3) e atualiza-se as potências individuais conforme a equação (4).

É importante ressaltar que após a atualização da potência, o fluxo de potência será executado para a atualização geração da barra *swing* (interna ao grupo 1) que contabilizará as perdas de potência do sistema. Assim sendo, a geração correta do grupo 1 será dada conforme a equação (11):

$$G_1^k = P_L - G_2^k - G_3^k + P_{Perdas}^k \quad (11)$$

em que P_{Perdas}^k representa as perdas na iteração k . Observa-se que a carga é mantida constante. Adicionalmente, como o objetivo é construir a RSD para análise da segurança à pequenas perturbações, procede-se com a análise modal do sistema de potência após a convergência do fluxo de potência.

O modelo dinâmico da rede é o mesmo utilizado em (Peres et al., 2021; Sauer & Pai, 1998).

Durante o processo iterativo é necessário calcular a função aptidão (*fitness*) fit_i^k de cada partícula. Os limites dos grupos 2 e 3 (equações (5b) e (5c)) são tratados intrinsecamente pelo PSO. Para o tratamento da restrição (5d), que define a região de segurança, é necessário adotar um esquema de penalização conforme a equação (12).

$$fit_i^k = \sqrt{(\Delta G_2^k)^2 + (\Delta G_3^k)^2} - \mu \cdot L_V \quad (12)$$

em que adotou-se $L_V = 10^{10}$. O coeficiente de penalização μ assume o valor zero (0) quando ξ for maior que 5% e quando a geração do grupo 1 estiver dentro dos seus limites de capacidade. Na ocorrência de qualquer violação ($\xi \leq 5\%$ e geração do grupo 1 fora dos limites), μ recebe o valor 1, indicando que a partícula em questão deve ser penalizada por estar fora dos limites de segurança. Em (Tinoco et al., 2021), para a obtenção da região segura da RSE, μ recebe o valor unitário quando qualquer restrição estática é violada. Ressalta-se que as partículas são divididas proporcionalmente entre os quadrantes da Fig. 2 (25% da população por quadrante) e não podem deixá-los com o objetivo de mapear corretamente a RSD. A população inicial segue essa mesma divisão (limitada a 20% ao redor do caso base). Por fim, a posição das partículas ao final das iterações é fornecida ao comando *boundary* do Matlab que delinea a RSD de forma correta.

Em (Parreiras et al., 2017) são construídas duas RSD distintas: uma para o caso base (ponto de operação atual) e uma para um conjunto de contingências pré-selecionadas. Nesse trabalho introdutório constrói-se somente a RSD do caso base.

4. ESTUDO DE CASO

4.1 Descrição do Sistema

O sistema *New England* ilustrado na Fig. 7 (Pai, 1989) é utilizado neste trabalho seguindo a divisão de grupos proposta em (F. M. Tavela et al., 2022). Os dados estáticos (barra, linhas e limites de geração) podem ser obtidos em (F. Tavela, 2020) e os dados dinâmicos podem ser obtidos em (Peres et al., 2021). Em todas as simulações, a metodologia proposta baseada no PSO foi executada considerando 56 partículas e 25 gerações. No ponto de operação base (ponto inicial usado para construir as regiões de segurança) tem-se a solução da Tabela 01. O coeficiente de amortecimento é igual a 6,36%. Os valores individuais de gerações são apresentados em (F. Tavela, 2020).

Tabela 1. Valores de geração (MW)

--	G_1	G_2	G_3
Base	4514	2363,2	1210
Mínimo	0	0	0
Máximo	6000	4000	2000

As simulações são realizadas no Matlab em um computador Intel Core i7 1.80 GHz com 16GB de RAM e sistema operacional Windows 10, 64 bits.

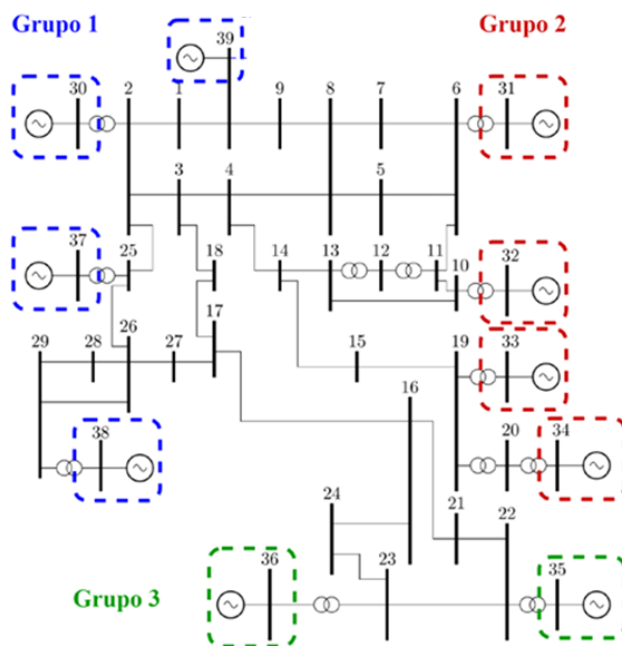


Fig. 7 Sistema *New England*. Fonte: (F. M. Tavela et al., 2022).

4.2 Região de Segurança Estática

A RSE para o sistema *New England* usando a metodologia convencional e o PSO foi apresentada em (F. Tavela, 2020) e (Tinoco et al., 2021), respectivamente. Duas contingências foram consideradas: linhas 26-27 e 26-29 fora de serviço.

No presente trabalho, como avaliação inicial, foi feita a implementação de ambas a metodologias. Na metodologia convencional, 64 direções com um passo de transferência de potência de 2MW foram adotadas. O custo computacional para a execução da metodologia convencional foi de 10,3 minutos e do PSO foi de 42 segundos. A Fig. 8 apresenta a comparação entre a região segura da RSE no plano $G_2 \times G_3$. Observa-se que o PSO apresentou uma região segura com precisão aceitável: a região segura é interior à curva da esquerda (que é hachurada em verde na da direita).

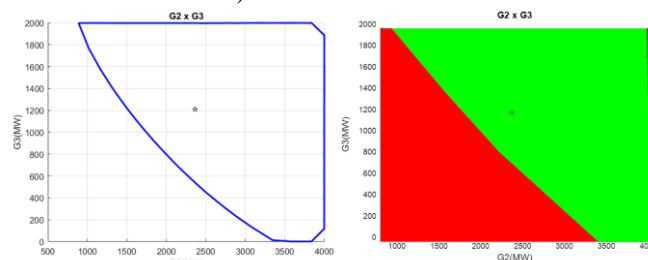


Fig. 8 Comparação dos nomogramas no plano $G_2 \times G_3$ da RSE obtidos pela metodologia convencional (esquerda) e PSO (direita).

4.3 Região de Segurança Dinâmica

Inicialmente foi executada a metodologia convencional utilizando um passo de transferência de potência de 1 MW bem como 10, 16 e 32 direções. Observa-se na Fig. 9 que

quanto maior o número de direções, mais precisa é a região segura.

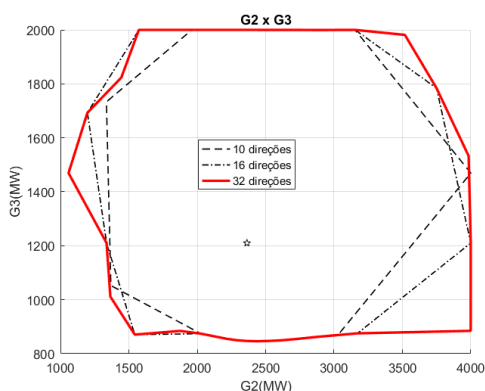


Fig. 9 Comparação dos nomogramas no plano G2xG3 da RSD obtidos pela metodologia convencional com diferentes direções.

As Fig. 10 a 12 apresentam um comparativo entre os nomogramas obtidos pelo PSO com os obtidos pelo método convencional (considerando 32 direções). O comparativo entre os esforços computacionais é apresentado na Tabela 2.

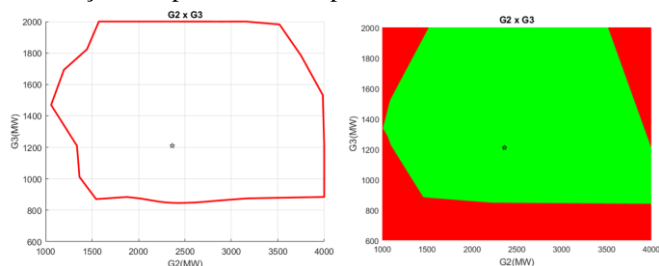


Fig. 10 Comparação dos nomogramas no plano G2xG3 da RSD obtidos pela metodologia convencional (esquerda) e PSO (direita).

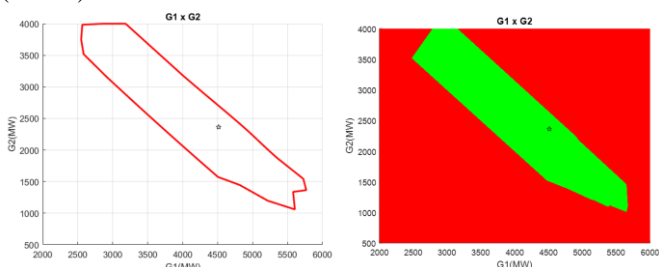


Fig. 11 Comparação dos nomogramas no plano G1xG2 da RSD obtidos pela metodologia convencional (esquerda) e PSO (direita).

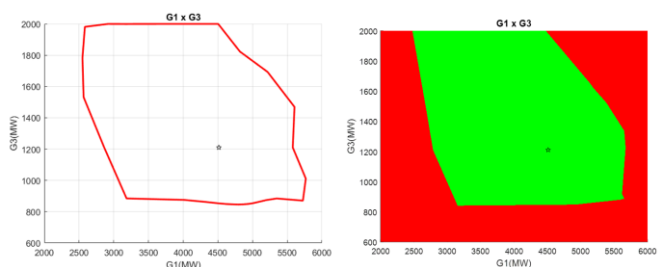


Fig. 12 Comparação dos nomogramas no plano G1xG3 da RSD obtidos pela metodologia convencional (esquerda) e PSO (direita).

Tabela 2. Esforço computacional

Metodologia	Partículas/Direções	Tempo (min)
PSO	56	5,7
Convencional	10	27,6
	32	95,3

A partir dos nomogramas das Fig. 10 a 12 e da Tabela 2 é possível observar que a metodologia proposta apresenta resultados preliminares promissores, sendo capaz de construir a RSD com precisão aceitável em um tempo computacional vantajoso. O principal diferencial está na não necessidade da definição de direções de busca e passos reduzidos de transferência de potência. Entretanto, devido ao aspecto randômico do PSO, a RSD obtida em diferentes simulações pode apresentar ligeiras diferenças com aquela apresentada pela metodologia convencional.

Cita-se por fim que as RSE e RSD são complementares e o operador deve escolher um ponto que satisfaça ambos os limites de segurança. Isso fica claro ao observar as Fig. 8 e 10.

4.4 Validação não Linear

Apesar do problema abordado nesse artigo estar associado a estabilidade a pequenas perturbações, quando o operador escolhe um cenário de despacho a partir das RSE e RSD, este ponto deve ser validado no contexto das grandes perturbações (estabilidade angular transitória). Considere um ponto de operação seguro do ponto de vista das RSE e RSD em que $G_2 = 3113 MW$ e $G_3 = 1764 MW$. O fator de amortecimento, nesse caso, vale 6,70%.

Como grande perturbação aplica-se um curto-circuito na barra 11 por 50ms o qual é eliminado a partir da abertura do circuito 10-11. O circuito é religado após 50ms. A Fig. 13 apresenta a variação do ângulo interno de alguns geradores em relação ao ângulo da barra de referência (gerador 39). Observa-se que o ponto escolhido também é viável do ponto de vista da estabilidade angular transitória.

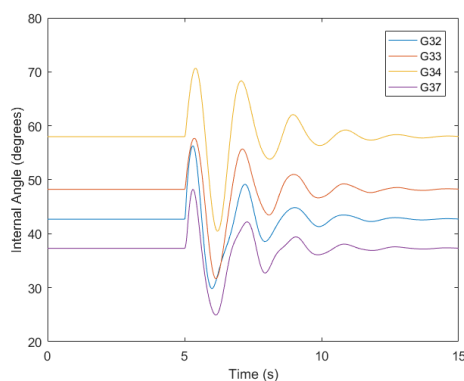


Fig. 13 Resposta no domínio do tempo.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma metodologia baseada na técnica PSO para obtenção de regiões de segurança dinâmica, as quais são ferramentas gráficas que permitem avaliar a distância do ponto de operação atual em relação aos limites de segurança (definidos por fatores de amortecimento dos modos

de oscilação eletromecânicos). Ao desprezar a influência do fator social do PSO, foi possível permitir que as partículas se movessem livremente no interior do espaço de busca com o objetivo de mapear a região de segurança. As comparações realizadas com o método convencional de construção das RSD mostraram que a técnica proposta é promissora ao apresentar regiões com boa precisão em um tempo computacional vantajoso.

Os estudos futuros focarão: (i) na construção das RSD considerando contingências e (ii) na avaliação do impacto do ajuste dos controladores de amortecimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, CAPES (*Finance Code 001*), CNPq e PPGEL (UFSJ) pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F. C. B., Passos Filho, J. A., Pereira, J. L. R., Henriques, R. M., & Marcato, A. L. M. (2013). Assessment of Load Modeling in Power System Security Analysis Based on Static Security Regions. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 24(1–2), 148–161. <https://doi.org/10.1007/s40313-013-0020-7>
- Alves, F. R. M. ., Almeida, L.P.; Fernandes, R.P.; Passos Filho, J.A.; Lirio, F. L. ., Henriques, R. M. ., La Gatta, P. O. ., & Gomes Junior, S. (2018). Using a Static and Dynamic Security Assessment Tool to Evaluate the Effects of Increasing Wind Power Penetration in Future Operating Conditions of the Brazilian Interconnected Power System. *Eletroevolução*, 91, 61–68.
- Assis, T. M. L., Kuenzel, S., & Pal, B. C. (2017). Impact of Multi-terminal HVDC Grids on Enhancing Dynamic Power Transfer Capability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(4), 2652–2662. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2617399>
- Francis, J. G. F. (1961). The QR Transformation A Unitary Analogue to the LR Transformation--Part 1. *The Computer Journal*, 4(3), 265–271. <https://doi.org/10.1093/comjnl/4.3.265>
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference On* , 4, 1942–1948 vols.4–1948 4.
- Moreira, T. G., Passos Filho, J. A., Pereira, J. L. R., & Melo, I. D. (2018). Avaliação da Região de Segurança Estática de Sistemas Elétricos de Potência: Uma abordagem utilizando Linearizações Sucessivas. *XXII Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2018*.
- Morison, K., Wang, L., & Kundur, P. (2004). Power system security assessment. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2(5), 30–39. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2004.1338120>
- Neto, C. A. S., Quadros, M. A., Santos, M. G., & Jardim, J. (2010). Brazilian System Operator online security assessment system. *IEEE PES General Meeting*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5590039>
- Pai, M. A. (1989). *Energy Function Analysis for Power System Stability* (1st ed.). Kluwer Academic Publishers.
- Pareto, R. P. (2016). *Construção da região de segurança estática de sistemas elétricos de potência utilizando direções de transferência de geração ramificadas*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Parreiras, T. J. M. A., Gomes Junior, S., & Taranto, G. N. (2017). Damping Nomogram Method for Small-Signal Security Assessment of Power Systems. *IEEE Latin America Transactions*, 15(5), 877–883. <https://doi.org/10.1109/TLA.2017.7910201>
- Peres, W., Passos Filho, J. A., Coelho, F. C. R., Poubel, R. P. B., & Costa, J. N. N. (2021). Dynamic transmission capability calculation using bioinspired optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 133, 107227. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107227>
- Sauer, P., & Pai, M. A. (1998). *Power system dynamics and stability* (1st ed.). Prentice Hall.
- Tavela, F. (2020). *Desenvolvimento de Técnicas Avançadas para Construção de Regiões de Segurança Estática*. Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Tavela, F. M., Filho, J. A. P., & Avila, O. F. (2022). Assessment of the Impact of Wind Generation Intermittency on Electric Power Systems through Security Regions. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. <https://doi.org/10.1007/s40313-021-00870-2>
- Tinoco, R. A. G., Passos Filho, J. A., Peres, W., & Henriques, R. M. (2021). A new particle swarm optimization-based methodology for determining online static security regions. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12790>